

~3–5°C) ведением журнала измерений в реальном времени.

Совместное применение нескольких термопар, с разным временем изменения градуированной характеристики дрейфа термоЭДС при одинаковой измерительной температуре позволяет сопоставлять результат измерений и внести поправочный коэффициент дрейфа термоЭДС при нормировании сигналов термопар. Это позволяет добиться повышения надежности измерительной системы и увеличивает достоверную выборку результатов измерений.

#### Литература

1. Рогельберг, И. Л. Сплавы для термопар. Справочник / И. Л. Рогельберг, В. М. Бейлин. – М., Металлургия, 1983. – 360 с.
2. Hysteresis Effects and Strain-Induced Homogeneity Effects in Base Metal Thermocouples / Iñigo González de Arrieta [et al.] // Int J Thermophys. – 2015. – Vol. 36. – P. 467–481.
3. Keysight Technologies Практические советы по измерению температуры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://etk-komplekt.ru>. – Дата доступа: 25.10.2022.

УДК 620.179.14/15

### ОЦЕНКА СТЕПЕНИ НЕОДНОРОДНОСТИ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ АДДИТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ МАГНИТОШУМОВЫМ МЕТОДОМ

Бусько В.Н.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** При изготовлении аддитивных материалов, как правило, возникает значительная неоднородность свойств по поверхности. Степень неоднородности зависит от методов и режимов получения 3D-материалов, характеристик лазера и металлических порошков, последующих обработок и др. факторов. Цель работы – магнитошумовым методом выявить и оценить степень неоднородности свойств по длине образцов стали 09Г2С, полученных методом селективного лазерного сплавления с разными последующими режимами термообработок, и с помощью литья. Установлено, что трехмерные отожженные, нормализованные, а также литые образцы по степени неоднородности значительно отличаются между собой, причем, нормализация резко снижает остаточные напряжения и приводит к снижению степени неоднородности. Результаты показали возможность оценки и контроля степени неоднородности аддитивных материалов магнитошумовым методом.

**Ключевые слова:** степень неоднородности, аддитивные технологии и материалы, магнитошумовой метод, физические и механические свойства, стальные образцы.

### ASSESSMENT OF STATE HETEROGENEITY OF ADDITIVE MATERIAL SAMPLES BY MAGNETIC NOISE METHOD

Busko V.

*Institute of Applied Physics of Belarus National Academy of Sciences  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** In the manufacture of additive materials, as a rule, there is a significant heterogeneity of properties in surface and depth. The degree of heterogeneity depends on the methods and modes of obtaining 3D materials, the characteristics of the laser and metal powders, subsequent treatments, and other factors. The purpose of the work is to detect and evaluate the degree of heterogeneity of FMS by the length of 09G2S steel samples obtained by selective laser fusion method under different thermal treatments and by casting. It was found that three-dimensional annealed, normalized, as well as cast samples differ significantly in the degree of heterogeneity among themselves, moreover, normalization sharply reduces residual stresses and leads to a decrease in heterogeneity. The results showed the possibility of evaluating and controlling the degree of heterogeneity of additive materials by the magnetic noise method.

**Key words:** degree of heterogeneity, additive technologies and materials, magnetic noise method, physical and mechanical properties, steel samples.

*Адрес для переписки: Бусько В.Н., ул. Академическая, 16, Минск 220072, Республика Беларусь  
e-mail: busko@iaph.bas-net.by*

Благодаря применению инновационных аддитивных технологий (АТ) в последнее время происходит резкий рост объемов производства 3D-изделий/деталей и интенсивное внедрение их в различные отрасли промышленности (особенно, в

машиностроении, авиакосмической отрасли и ракетостроении, строительстве, медицине) [1].

В трехмерных изделиях ввиду отличного от традиционных способов их получения (литье, ковка, штамповка, фрезерование и др.), более

ярко проявляются неоднородность свойств, шероховатость, анизотропия, остаточные напряжения, текстура, дефектность, препятствующих повышению физико-механических свойств (ФМС) [1, 2]. Влияющим на качество и ФМС изделий фактором является неоднородность свойств по поверхности изделия, которая считается не менее важным, чем технологическая анизотропия [3].

Возникающая в процессе производства АТ-изделий неоднородность состояния, влияющая на ФМС изделия, обусловлена различием размеров, строением, ориентациями и химическим составом фаз и зерен, напряжениями, обработкой и другими факторами. Поэтому при изготовлении АТ-изделий необходим их мониторинг или неразрушающий контроль (НК) с применением различных физических методов. Проблема уменьшения степени неоднородности АТ-изделий может быть решена путем проведения специальных термических обработок, режимы и виды которых необходимо подбирать экспериментальным путем с учетом конкретной марки используемой порошковой стали и ее характеристик, т. к. их влияние может оказать решающее значение на ФМС, особенно, на прочностные [4]. Эффективными методами контроля качества и ФМС АТ-изделий являются ультразвуковые, вихретоковые, рентгеновские, капиллярные и магнитные [5]. К ним относится магнитошумовой метод, основанный на магнитном эффекте Баркгаузена (МЭБ), параметры которого благодаря связи с доменной структурой ферромагнетика чувствительны к любым изменениям структурных и других составляющих.

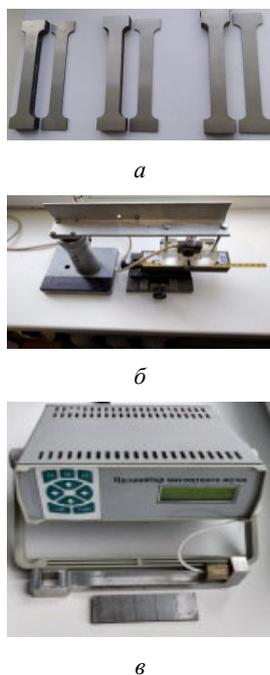


Рисунок 1 – Образцы для исследования неоднородности состояния поверхности (а), схема измерения МШ с устройством для сканирования ПБ1 по образцу (б), анализатор МШ (в)

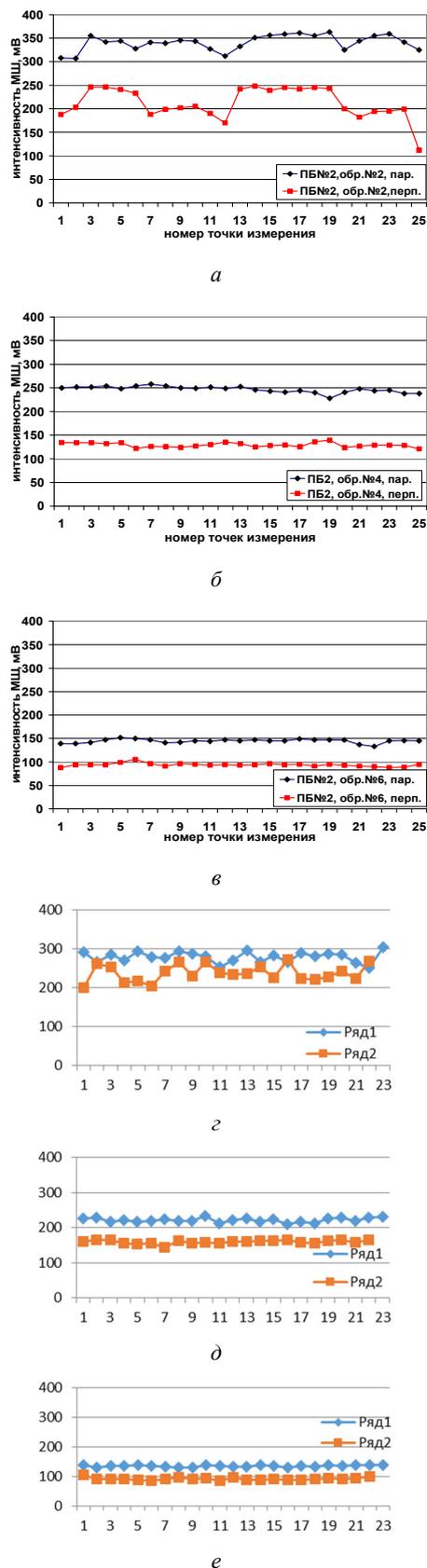


Рисунок 2 – Распределение уровня МШ по длине отожженного (а, г), нормализованного (б, д) и литого (в, е) образцов толщиной 2 мм при ортогональных положениях ПБ2: (а-в) – 1-я партия; (г-е) – 2-я (ПБ1)

Степень неоднородности изучалась на образцах, полученных методом селективного лазерного сплавления/спекания (СЛС) и литьем толщиной 2 и 10 мм (6 образцов) и толщиной 2 мм (3 образца). Размеры и формы образцов соответствовали ГОСТ для проведения в последующем усталостных испытаний. Длина образцов – 150 мм, ширина 15 мм в средней части и 30 мм в галтельной (образцы предоставлены ИФМ РАН им. Н.М. Михеева), которые были разделены на 2 партии: первая – 4 образца толщиной 2 и 10 мм, полученные методом СЛС и 2 образца с помощью литья; вторая партия (получена резкой образца толщиной 10 мм до 2 мм) – 2 образца получены методом СЛС и 1 образец – литьем. Исходный компонент – порошок малоуглеродистой стали 09Г2С с размером фракций 10–45 мкм. Режимы термообработок образцов приведены в [2], технические характеристики 3D-принтера в [4]. После изготовления трехмерных образцов одна их часть подвергалась рекристаллизационному низкотемпературному отжигу, вторая нормализации с охлаждением на воздухе. Обе поверхности подвергались механической обработке (шлифовке) вдоль оси абразивным камнем с малой подачей и водяным охлаждением (шероховатость составляла 5–8 мкм). Для примера на рис. 1, *а* показаны образцы 1-й партии, рис. 1, *б* – схема измерения магнитного шума (МШ) с устройством для сканирования преобразователем Баркгаузена (ПБ) по образцу, рис. 1, *в* – магнитошумовой анализатор типа ИМШ [2].

На рис. 2, *а–в* показаны зависимости уровня МШ от номера точки измерения при сканировании с шагом 5 мм по длине рабочей части образцов 1-й партии на одной из поверхностей в исходных (до циклирования) состояниях, полученные с помощью ПБ2 при его ортогональных положениях, на рис. 2, *г–е* – 2-й партии (ПБ1). Для обоих ПБ видна значительная разница уровня МШ и неоднородности между образцами, отличающимися между собой режимами термической обработки и свидетельствующая о микроструктурных отличиях, разнице остаточных напряжений, технологической анизотропии и дефектности. Ход зависимостей отражает и характеризует степень неоднородности свойств по длине образцов.

Наибольшая степень неоднородности по данным МШ наблюдается у отожженного образца (рис. 2 *а, г*). Нормализация (рис. 2 *б, д*) приводит к резкому снижению остаточных напряжений и, соответственно, степени неоднородности, которая приближается к литому образцу (рис. 2 *в, е*). Видно «сглаживание» распределения уровня МШ по длине образца, что является ожидаемым и закономерным. Значения дисперсии  $D$ , являющейся мерой разброса текущих данных от среднего значения и используемая как критерий неоднородности свойств по длине образца, это подтверждает.

Также видно, что степень неоднородности по длине 3D и литых образцов значительно отличается между собой, что обусловлено не только фазово-структурными отличиями, вносящими основной вклад в сигнал, но и напряжениями, анизотропией, наличием дефектов и постобработкой. Ее оценка и контроль в трехмерных изделиях необходимы при отработке методов получения, видов и режимов термической и поверхностной обработок для достижения высоких ФМС. Оцениваемое с помощью МЭБ распределение неоднородности свойств может быть использовано не только при отработке технологического процесса, но и контроле качества при производстве АТ-изделий.

#### Литература

1. Стратегия развития аддитивных технологий // Аддитивные технологии, 2021. – № 4. – С. 10–11.
2. Особенности циклической усталостной прочности образцов, полученных селективным лазерным спеканием из стали 09Г2С / В. Н. Бусько [и др.] // Неразрушающий контроль и техническая диагностика. – 2020. – № 4. – С. 16–25.
3. Sames, W. J. Heat treatment of electron beam melted (EBM) Ti-6Al-4V: microstructure to mechanical property correlations / W. J. Sames, S. Raghavan, // Rapid Prototyping Journal. – 2018. – Vol. 24, № 4/ – P. 774–783.
4. Структура и магнитные свойства стали 09Г2С, полученной методом селективного лазерного сплавления / А. П. Ничипурук [и др.] // Физика твердого тела. – 2021. – Т. 63. – С. 1719–1724.
5. Алешин, Н. П. Применение методов неразрушающего контроля для оценки качества деталей непосредственно в процессе аддитивного производства / Н. П. Алешин // Дефектоскопия. – 2016. – № 9. – С. 64–71.